doi:10.13866/j.azr.2019.06.14

陕西省人体舒适度变化及其对气象因子的响应①

胡　琳[1]，胡淑兰[1]，苏　静[2]，张　侠[1]，王　琦[1]，何晓媛[1]
（1. 陕西省气候中心，陕西 西安　710014；2. 陕西省大气探测中心，陕西 西安　710014）

摘　要：利用陕西省96个国家气象站多年逐日观测资料，统计分析人体舒适度指数（CIHB），探讨各种环境因素对人体冷热舒适程度的影响，结果表明：①陕西省1981—2016年舒适度和舒适等级日数均成北少南多，并且随海拔的升高而降低的变化特点，其中汉中等9站舒适等级日数多年平均大于200 d，榆林等7站舒适等级日数多年平均小于120 d；②各区域舒适频率呈现明显的单峰分布，陕北7—8月舒适等级频率较高，关中6—8月舒适等级频率较高，陕南6—9月舒适等级频率较高；③全省历年平均CIHB为45.7，舒适等级日数92.4 d，CIHB和舒适等级日数均在1998—1999年和2008—2009年出现2次峰值；④气温与舒适度指数的相关性极显著，相关系数高达0.960 5，平均风速与CHIB显著负相关，气温较高时相对湿度与舒适度指数显著正相关。

关键词：人体舒适度指数；舒适度分级；舒适等级日数；舒适期；陕西

人体舒适度是以人类肌体与近地大气之间的热交换原理为基础，从气象角度评价人类在不同气候条件下舒适感的一项生物气象指标[1]。人体舒适度指数（CIHB）是表征人体对空气环境感觉舒服的程度，是人居环境、旅游资源评价的重要指标之一[2]。关于舒适度评价研究已有近百年历史，Thom等描述了湿度对人体舒适感；美国国家气象局提出温湿指数并用于舒适度预报工作，建立了多种舒适度指标[3-6]，近年来在我国得到了极其广泛的应用。王远飞等先后采用上述模型分别对上海、山东、山西等地的气候舒适度进行了有益的探索[7-10]，但关于陕西省的气候舒适度研究尚不多见。本文利用全省96个国家气象站1981—2016年逐日平均气温、平均风速、平均相对湿度等气象观测资料，采用中国气象局气候影响评价方法[11]，统计分析陕西省人体舒适度指数（CIHB），划分气象舒适度等级，重点探讨各种环境因素对人体冷热舒适程度的影响，揭示陕西省人体舒适度的时空变化规律及其对区域气候变暖的响应。本研究针对大众生活需要建立人体舒适度指标，用以提示公众根据气象因素的变化及时调节生理、适应环境以及采取一些有效防范措施，并尽可能为旅游开发、城市气象预报、节能减排、城市规划和建设持续发展的气候宜居城市圈决策提供理论参考。

1　资料与研究方法

1.1　研究区概况

陕西省位于105°29′～111°15′E、31°42′～39°35′N之间，因秦岭—淮河一线而横跨北方与南方。区域整体属大陆季风性气候，地势的总特点是南北高，北山和秦岭把陕西分为3大自然区域，北部是陕北高原，中部是关中平原，南部是秦巴山区。境内南北间气候的明显差异，温度由南向北逐渐降低，年降水量南多北少。

1.2　数据与方法

1.2.1　*数据来源*　本文剔除由于台站资料缺失及部分台站搬迁造成的资料不连续数据，综合考虑气象要素的物理特性和气象台站分布特性，选取全省96站1981年1月1日至2016年12月31日平均气温、平均相对湿度、平均风速等长序列气象观测资料。数据来源于陕西省气象信息中心，资料经过初步质量控制，准确可靠。

① **收稿日期：**2019-01-25；　**修订日期：**2019-07-11
基金项目：中国气象局气候变化专项（CCSF201938）；中国气象局预报员专项（CMAYBY2019-119）资助
作者简介：胡琳（1975-），女，陕西户县人，高级工程师，主要从事环境气象及气候服务方面的研究. E-mail: hllinbb@126.com
通讯作者：胡淑兰. E-mail: 348009941@qq.com

1.2.2　研究方法

(1) 人体舒适度指数及舒适度分级

目前,国内外评价舒适度的指标很多。本文采用国内近年来比较流行的人体舒适度指数(comfort index of human body,CIHB)[12],并将其划分为9个等级来对舒适度进行评定(表1)。该指数同时考虑了平均温度、平均相对湿度及风速对人体舒适度的影响,计算公式如下:

$$CIHB = 1.8t - 0.55(1.8t - 0.26)(1 - RH) - 3.2\sqrt{v} + 32 \quad (1)$$

式中:t为平均气温(℃);RH为平均相对湿度(%);v为风速($m \cdot s^{-1}$)。

表1　人体舒适度指数(CIHB)

Tab.1　Comfort index of human body

指数段	等级	对应人体感觉
≥86	4	人体感觉很热,极不舒服,需注意防暑降温,以防中暑
80~85	3	人体感觉炎热,很不舒适,需注意防暑降温
76~79	2	人体感觉偏热,不舒适,需适当降温
71~75	1	人体感觉偏暖,较为舒适
59~70	0	人体感觉最舒适,最可接受
51~58	-1	人体感觉偏凉,不舒适,需注意保暖
39~50	-2	人体感觉偏冷,很不舒适,需注意保暖
26~38	-3	人体感觉很冷,很不舒适,需注意保暖防寒
≤25	-4	人体感觉寒冷,极不舒适,需要保暖防寒,防止冻伤

(2) 舒适等级

为方便舒适日数统计,根据中国气象局规定的统一标准将人体舒适度划分为9个级别,其中将2、3、4级统称热不舒适等级,将1、0、-1级统称舒适等级,将-2、-3、-4统称冷不舒适等级,日舒适度等级为1、0、-1级时记作一个舒适等级日。以每年第一个舒适等级日为起始舒适日,最后一个舒适日为终止舒适日,不考虑时间段之间的连续,起始日和终止日之间为舒适期。

2　结果与分析

2.1　人体舒适度指数(CIHB)和舒适等级日数的空间分布

从图1和图2可以看出,陕西省1981—2016年CIHB和舒适等级日数成明显的正相关关系,相关系数为0.981 2,通过0.01显著性水平检验。CIHB和舒适等级日数的空间分布格局相似,二者均具有北

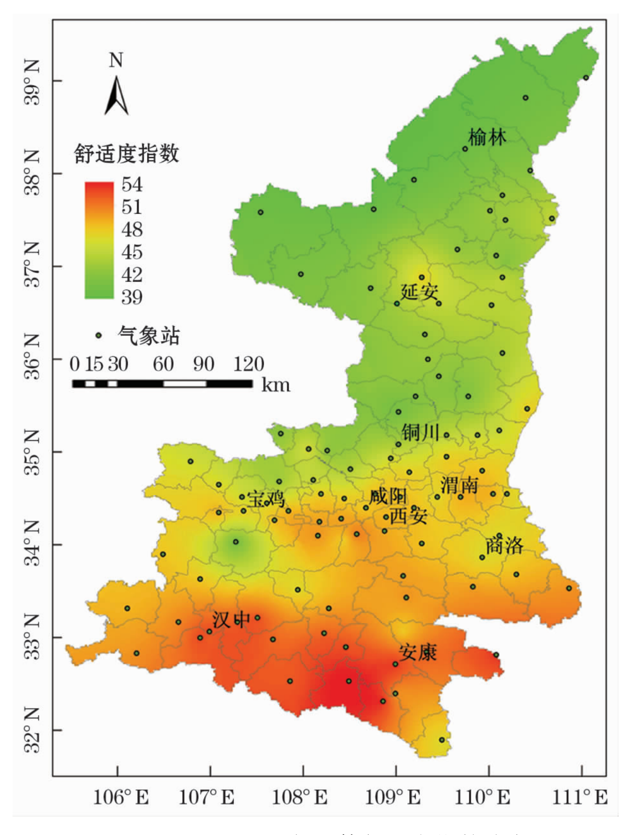


图1　1981—2016年人体舒适度指数分布

Fig.1　Distribution of comfort index of human body from 1981 to 2016

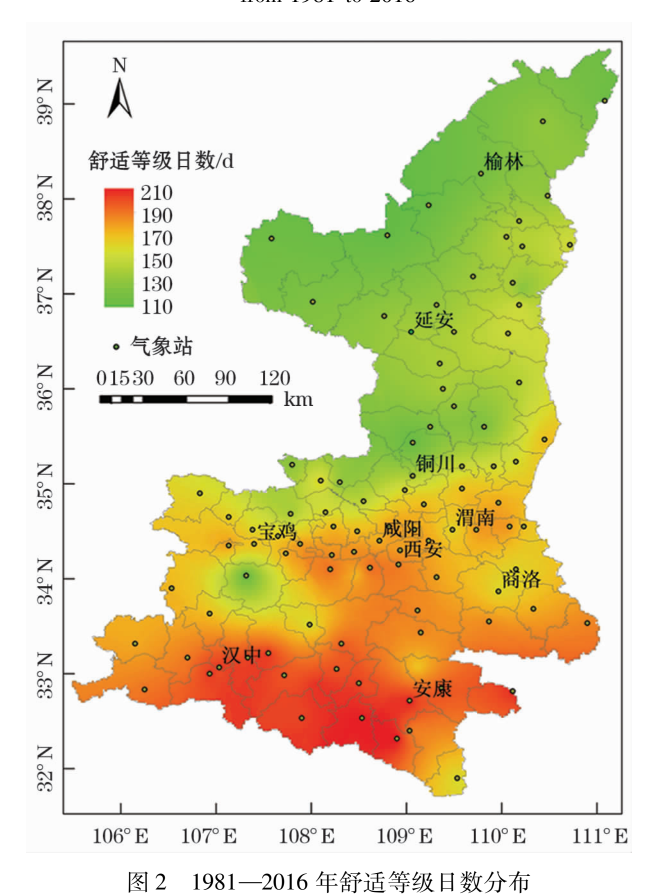


图2　1981—2016年舒适等级日数分布

Fig.2　Distribution of comfort days from 1981 to 2016

少南多,并随海拔的升高而降低的变化特点。

陕南大部分地区多年平均 CIHB 都处于舒适等级范围内,陕北部分地区海拔高,属中温带半干旱大陆性季风气候,秋冬季气温较低,CIHB 偏低。巴山山区和汉江河谷地带(汉中盆地)的舒适度和舒适等级日数最高,陕北北部毛乌素沙漠和黄土高原过渡地带的 CIHB 和舒适等级日数最低,其中岚皋、紫阳、安康、白河、汉中等 9 站舒适等级日数多年平均均大于 200 d,岚皋舒适等级日数多年平均近 210 d,定边、靖边、横山、府谷、榆林等 7 站舒适等级日数多年平均均小于 120 d,定边舒适等级日数多年平均近 100 d,不足岚皋的一半。气候差异可能是陕西南北部 CIHB 和舒适等级日数差异较大的主要原因。

2.2 人体舒适度指数(CIHB)和舒适等级日数的时间变化特征

从图 3 可以看出,全省 CIHB 和舒适等级日数变化特点基本一致,均呈夏季高、冬季低的特点,6、7 月和 8 月的 CIHB 和舒适等级日数平均值较高,11—12 月和 1—3 月 CIHB 较低,舒适等级日频率低,不足 1%。

为进一步明确舒适日数在一年之中的变化,本研究将全省按气候特点分为陕北、关中和陕南3个

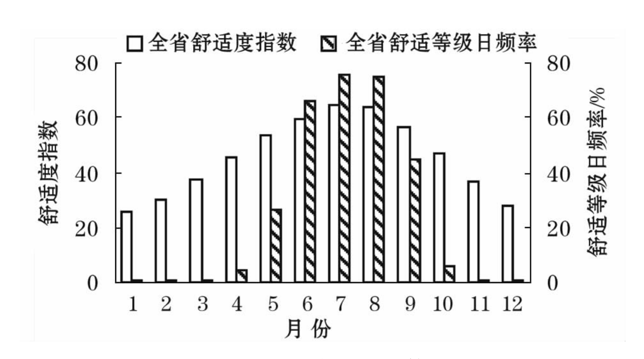


图 3 1981—2016 年陕西省人体舒适度指数和舒适等级日频率月变化

Fig. 3 Monthly variation of comfort index of human body and frequency of comfort level from 1981 to 2016

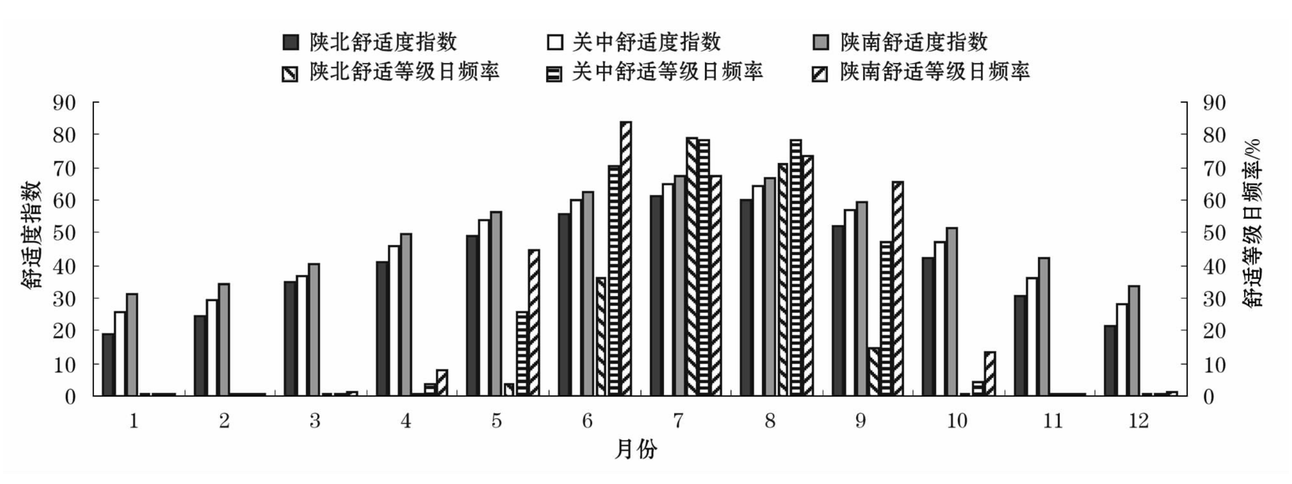


图 4 1981—2016 年陕西省各区域人体舒适度指数和舒适等级日频率月变化

Fig. 4 Monthly variation of comfort index of human body and frequency of comfort level in different regions of Shaanxi Province from 1981 to 2016

区域,分别讨论其逐月区域平均 CIHB 和舒适等级日频率的多年平均值,比较不同区域的舒适等级日数的区域平均值。由图 4 可以看出,各区域舒适等级日频率呈现明显的单峰分布,但出现时间有明显差异,其中陕南舒适等级日频率最大,出现在 6 月达 84%,陕北和关中 7 月舒适等级日频率最高,达近 80%。陕北 7—8 月舒适等级日频率较高,关中 6—8 月舒适等级日频率较高,陕南 6—9 月舒适等级日频率较高。

分别统计全省 3 个区域舒适等级起始日、终止日及舒适期长度(表2)。由表2可以看出,陕北舒

表 2 陕西省各区域舒适等级日出现日期

Tab. 2 Occurrence dates of comfort level days in different regions of Shaanxi Province

区域	平均起始 日/月 - 日	平均终止 日/月 - 日	最早起始日	最晚终止日
全省	04 - 14	10 - 03	-	-
陕北	04 - 30	09 - 19	2015 - 03 - 31 (延长、甘泉)	1986 - 11 - 01 (延川)
关中	04 - 14	10 - 02	2013 - 03 - 08 (临潼、长安、大荔)	1986 - 11 - 12 (长安、潼关)
陕南	04 - 02	10 - 27	2010 - 02 - 25 (平利)	1993 - 11 - 27 (西乡)

适期平均 142 d,关中舒适期平均 166 d,陕南舒适期平均 199 d;陕北舒适等级日平均分布在 4 月底至 9 月中旬,关中平均在 4 月中旬到 10 月初开始出现舒适等级日,而陕南舒适等级日平均分布在 4 月初至 10 月中下旬,其中陕北舒适等级日最早出现在 2015 年 3 月 31 日的延长和甘泉,延川舒适等级日最晚出现 1986 年的 11 月 1 日,关中舒适等级日最早出现在 2013 年 3 月 8 日的临潼、长安和大荔,长安和潼关舒适等级日最晚出现于 1986 年 11 月 12 日,陕南最早出现舒适等级日在平利的 2010 年 2 月 25 日,最晚在西乡的 1993 年 11 月 27 日。

总体上,陕北舒适等级日出现较晚、结束较早;关中次之,舒适等级日数以陕南最多。陕西省舒适等级日时间跨度和出现频率均呈自南向北逐渐递减态势,但是 7—8 月陕北舒适等级频率较高,适于避暑度假。

2.3 人体舒适度指数(CIHB)和舒适等级日数的多年变化趋势

从陕西省历年平均人体舒适度指数和舒适等级日变化曲线看(图 5),全省历年平均 CIHB 为 45.7,舒适等级日数 92.4 d,频率 44.1%,历年平均 CIHB 和舒适等级日数变化呈缓慢增长趋势;CIHB 和舒适等级日数均在 1998—1999 年和 2008—2009 年出现 2 次峰值,舒适等级日出现频率接近 50%,1981 年最少,约 40%。

从 5 a平均滑动曲线看,舒适度的阶段性变化

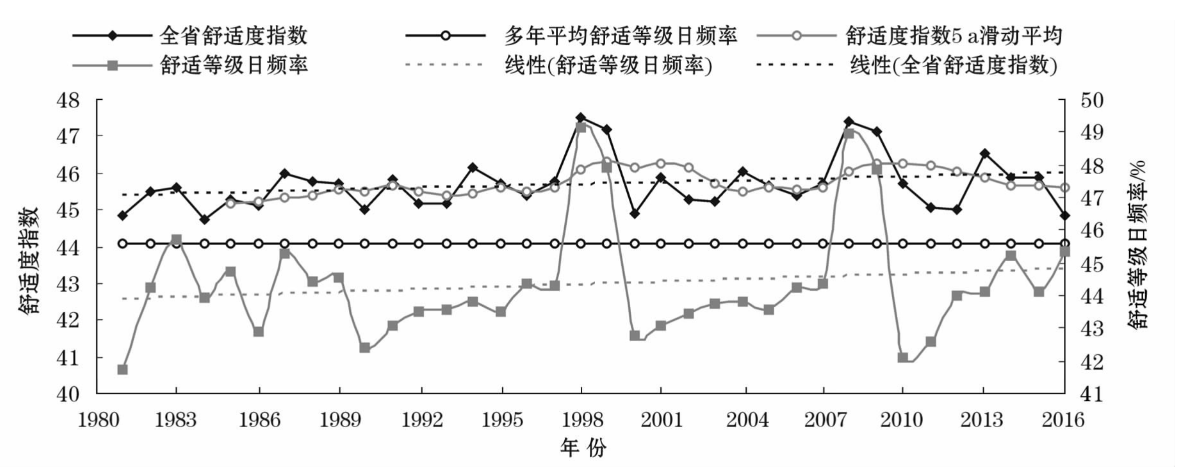


图 5 1981—2016 年陕西省人体舒适度指数和舒适等级日频率多年变化趋势

Fig. 5 Change trend of comfort index of human body and frequency of comfort days in Shaanxi Province from 1981 to 2016

较为明显,在 20 世纪 80 年代 CIHB 和舒适等级频率缓慢增加,1990—2000、2001—2010 年和 2011 年至今 3 个阶段均出现开始急剧减少,后恢复性增长的特点。

由距平历年变化分布上也可以看出,从 1981 年开始至今,陕西省舒适等级日数阶段变化显著,1998 年和 2008 年舒适等级日数均较常年增加约 18 d,1999 年和 2009 年增加约 14 d,1981 年为 36 a 来陕西省舒适等级出现最少年,较常年偏少约 9 d,2010 年为第二少年,且较常年偏少约 7 d。

3 人体舒适度指数(CIHB)对气象因子的响应

本文计算 CIHB 时,综合考虑温度、湿度和风速的影响,以下主要探讨平均气温、平均相对湿度、平均风速等气象因子与 CIHB 的相关关系,从而寻找不同区域各气候因子对 CIHB 的贡献率差异。从图 6 可以看出,逐日平均气温与 CIHB 的相关性极显著,相关系数高达 0.960 5,各区域逐日平均气温与 CIHB 相关系数均达 0.8 以上,达到 0.01 置信水平,其中关中相关系数最高,达 0.964 5。

图 7 为全省和各区域多年月平均气温、平均相对湿度和平均风速与 CIHB 相关关系。从图 7 可以看出:全省和各区域各月平均气温与 CHIB 显著相关,并且相关系数自北向南增加,其中月平均气温与 CHIB 冬、春季相关系数最高,陕南冬、春季月平均气温与 CHIB 相关系数均达 0.8 以上。全省逐月平均相对湿度与 CHIB 显著正相关,夏、秋季当气温较高时,随着相对湿度的增加 CHIB 增大,可能产生热不舒适等级日,而与平均气温影响不同的是相对湿度与 CHIB 的相关系数自北向南减少,陕北夏、秋季平

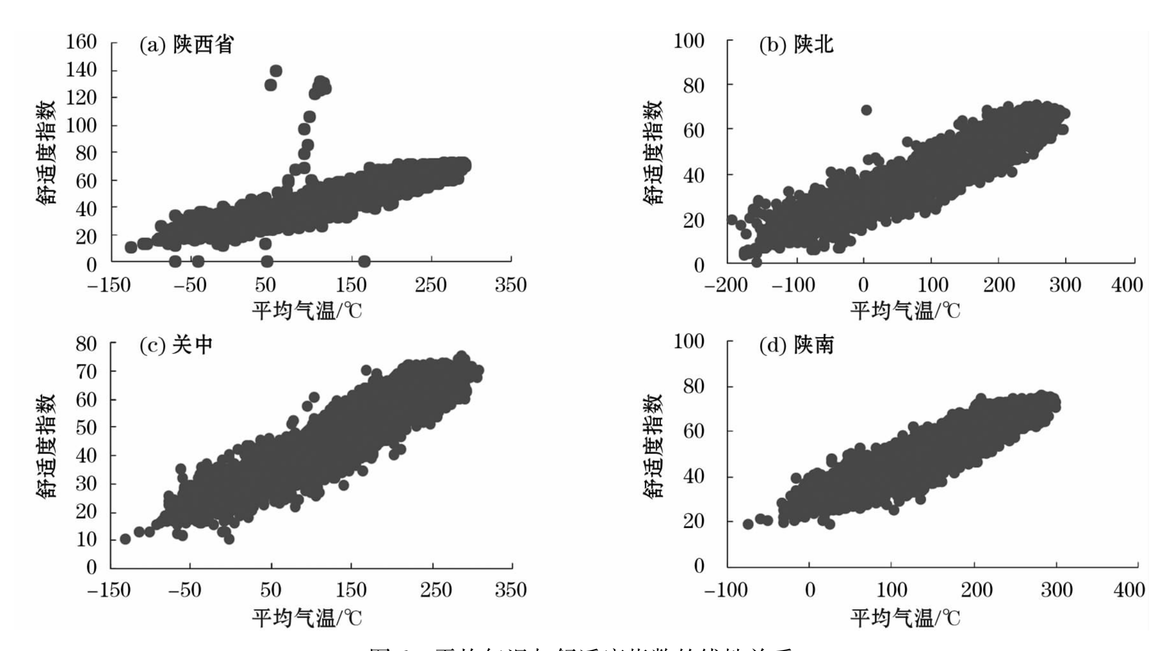
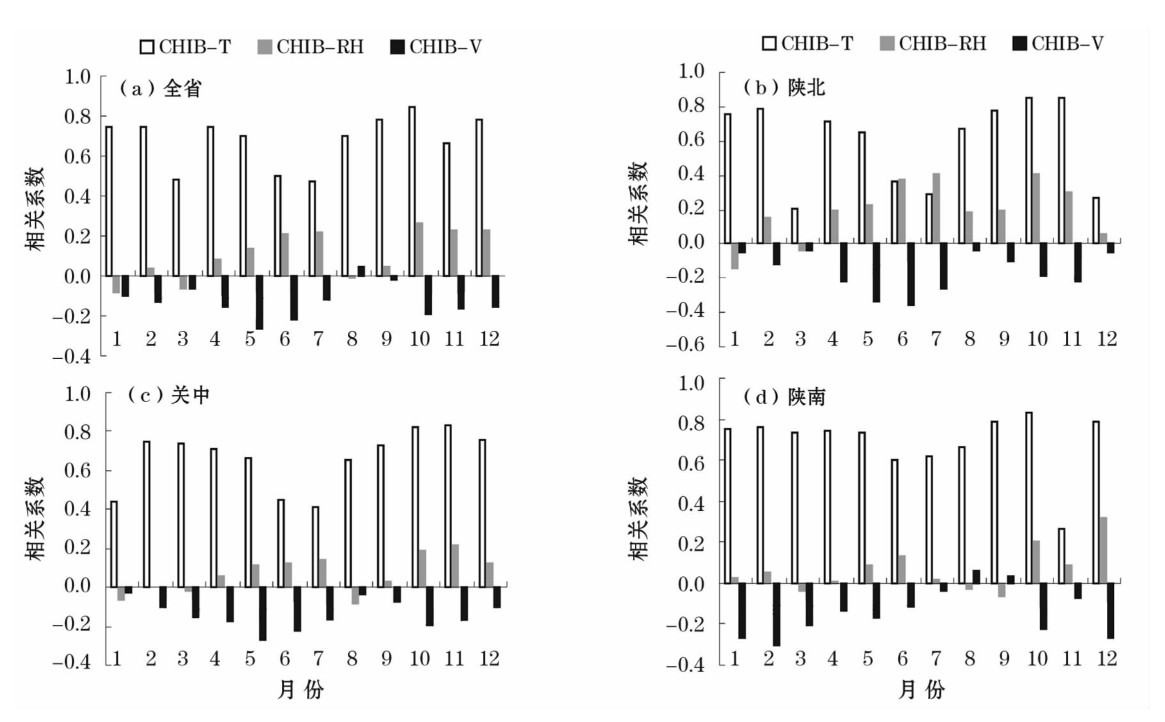


图6　平均气温与舒适度指数的线性关系

Fig. 6　The linear relation between average air temperature and CIHB



注:CHIB 为人体舒适度指数;T 为平均温度;RH 为平均相对温度;V 为平均风速。

图7　平均温度、平均相对湿度及平均风速与 CHIB 的逐月相关系数

Fig. 7　Correlation coefficients among monthly mean temperature, relative humidity, wind speed and CIHB

均相对湿度对 CHIB 影响较大。全省和各区域月平均风速与 CHIB 基本上成负相关关系,其中冬季风速增大会使 CHIB 降低,低温感觉加剧,而夏季较大的风可以加速空气流动、增强乱流,有利于人体散热,人体感觉舒适,舒适等级日会有所增加。

总体上看,气候要素的变化是导致人体舒适度变化的根本原因,舒适度指数受温度影响更多一些,而相对湿度的变化和风速作为辅助指标,对人体舒适度指数有着增大或减小的作用,这与董蕙青、肖晶晶等[13-15]的研究结论基本一致。

4　讨 论

与国内外已有研究相比,本文采用了目前最广

泛的人体舒适度指数,综合考虑了气温、湿度及风速等多种气象要素的影响,获得准确可靠的陕西省舒适度指数序列,并且从时空变化视角分析了陕西省的人体舒适度指数分布特征及其对气象因子的响应,得出人体舒适度主要受气温的影响,当夏季气温较高时相对湿度可对人体舒适度产生较大影响,较高湿度易造成热不舒适等级,风速也是影响舒适度指数的重要因子。但是,本文的研究工作也存在一些不足,人体舒适度指数设计没有考虑人体对气候环境的适应,降低了研究结果的应用价值。另外,在研究视角上,本文主要以气温、湿度、风速为基础的人体舒适度指数进行分析,在自然因素上没有考虑其他气象要素,如太阳辐射、气压、降水和各种极端天气事件的影响,也没有考虑城市发展等社会因素。因此,在今后研究中还需开展多因素、长序列、多时空特征等因素的影响分析,建立更加完善的气候舒适度指标,同时进一步分析人体实际热感觉,探讨各种环境因素(如温度、湿度、太阳辐射等)对人体冷热舒适程度的影响, 进一步探讨不同环境条件下的气候舒适度,建立一个多气象因子的气候舒适度评价模型。

5　结 论

(1) 陕西省 1981—2016 年舒适度和舒适等级日数变化表现一致,均呈北少南多、并且随海拔的升高而降低的变化特点,陕南大部分地区多年平均 CIHB 处于舒适等级范围内, 舒适等级日数相对较多,陕北部分地区 CIHB 偏低。其中,陕南岚皋、汉中等9 站舒适等级日数多年平均大于 200 d,岚皋最多舒适等级日数多年平均近 210 d,陕北定边、榆林等 7 站舒适等级日数多年平均小于 120 d,定边最少,舒适等级日数多年平均仅 100 d,不足岚皋的一半。

(2) 各区域 CIHB 和舒适频率呈现明显的单峰分布,其中陕南舒适日出现频率最大,出现在 6 月达 84%,陕北和关中 7 月舒适日出现频率最高,近达 80%。各区域舒适等级日出现时间有明显差异,陕北舒适等级日平均分布在 4 月底至 9 月中旬,关中平均在 4 月中旬到 10 月初,而陕南舒适等级日平均分布在 4 月初至 10 月中下旬,陕北舒适等级日出现较晚结束较早,关中次之,舒适等级日数在陕南达到最高值,陕西省舒适等级日时间跨度和出现频率均呈自南向北逐渐递减态势。

(3) 全省历年舒适等级日数 92.4 d,频率 44.1%,陕北舒适期平均 142 d,关中舒适期平均 166 d,陕南舒适期平均 199 d;舒适度的阶段性变化较为明显,历年平均人体舒适度和舒适等级日数变化呈缓慢增长趋势。其中,CIHB 和舒适等级日数均在 1998—1999 年和 2008—2009 年出现 2 次峰值,舒适等级日数较常年增加约 10 d 以上。

(4) 气温与舒适度指数的相关性极显著,平均风速与 CHIB 呈显著负相关,气温较高时相对湿度与舒适度指数显著正相关,舒适度指数受温度影响更多一些,当气温较高或偏低时,湿度、风速变化会显著地影响人体舒适度指数。

参考文献(References):

[1] 张立杰,张丽,李磊,等. 2011 年深圳人体舒适度空间分布特征及影响因子分析[J]. 气象与环境学报,2013,29(6):134－139. [Zhang Lijie,Zhang Li,Li Lei,et al. Spatial distribution of human comfort index and its impact factors in 2011 in Shenzhen[J]. Journal of Meteorology and Environment,2013,29(6):134 －139.]

[2] 党冰,张博凯,李佳平,等. 平凉市崆峒山旅游气候及人体舒适度特征分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(2):75－79. [Dang Bing,Zhang Bokai,Li Jiaping,et al. Analysis of mountain tourist climate and human comfort in Pingliang,Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University(Nature Sciences),2012,48(2):75－79.]

[3] Yaglou C P,Minard D. Control of heat casualties at military training centers[J]. American Medical Association Archives of Industrial Health,1957,16:302－316.

[4] Thom E C. The discomfort index[J]. Weathervise,1959,12(2):57－61.

[5] Siple P,Passel C F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures[J]. Proceedings of the American Philosophical Society,1945,89(1):177－199.

[6] OFCM. Report on Wind Chill Temperature and Extreme Heat Indices:Evaluation and Improvement Projects[R]. Washington DC:U. S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration,Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research,2003.

[7] 王远飞,沈愈. 上海市夏季温湿效应与人体舒适度[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),1998(3):60－66. [Wang Yuanfei,Shen Yu. Temperature and humidity effect and human comfort in summer in Shanghai[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science Edition),1998(3):60－66.]

[8] 杨成芳. 山东省旅游气候舒适度研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004. [Yang Chengfang. Study on Climate Comfort Index in Shandong Province[D]. Qingdao:Ocean University of China,2004.]

[9] 王华芳. 山西省旅游气候舒适度分析与评价研究[D]. 太原:山西大学,2007. [Wang Huafang. Analysis and Evaluation of

Tourist Climate Comfort in Shanxi Province〔D〕. Taiyuan:Shanxi University,2007.〕
〔10〕马丽君,孙根年,王洁洁. 中国东部沿海沿边城市旅游气候舒适度评价〔J〕. 地理科学进展,2009,28(5):713 -722.〔Ma Lijun,Sun Gennian,Wang Jiejie. Evaluation of tourist climate comfortableness of coastal cities in the east China〔J〕. Progress in Geography,2009,28(5):713 -722.〕
〔11〕国家气候中心. 全国气候影响评价〔M〕. 北京:气象出版社,2004:113 -114.〔National Climate Centre. China Climate Impact Assessment〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,2004:113 -114.〕
〔12〕吴兑,邓雪娇. 环境气象学与特征天气预报〔M〕. 北京:气象出版社,2001:162 -189.〔Wu Dui,Deng Xuejiao. Environmental Meteorology and Special Meteorological Forecasts〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,2001:162 -189.〕
〔13〕董蕙青,黄海洪,黄香杏,等. 南宁市"人体舒适度"预报系统〔J〕. 广西气象,1999,20(3):37 -40.〔Dong Huiqing,Huang Haihong,Huang Xiangxing,et al. Prediction system of human comfort in Nanning City〔J〕. Journal of Guangxi Meteorology,1999,20(3):37 -40.〕
〔14〕肖晶晶,李正泉,郭芬芬,等. 浙江省人居环境气候适宜度概率分布分析〔J〕. 气象与环境科学,2017,40(1):120 -125.〔Xiao Jingjing,Li Zhengquan,Guo Fenfen,et al. Probability distribution analysis of climate suitability degree for human settlement environment in Zhejiang Province〔J〕. Meteorological and Environmental Sciences, 2017,40(1):120 -125.〕
〔15〕何静,田永中,高阳华,等. 重庆山地人居环境气候适宜性评价〔J〕. 西南大学学报(自然科学版),2010,32(9):100 -106.〔He Jing,Tian Yongzhong,Gao Yanghua,et al. Climate suitability assessment of human settlements in Chongqing mountainous areas〔J〕. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2010,32(9):100 -106.〕

Variation of Comfort Index of Human Body and Its Response to Meteorological Factors in Shaanxi Province

HU Lin[1], HU Shu-lan[1], SU Jing[2], ZHANG Xia[1], WANG Qi[1], HE Xiao-ai[1]

(1. *Shaanxi Provincial Climate Center*, *Xi'an* 710014, *Shaanxi*, *China*;
2. *Shaanxi Provincial Atmospheric Sounding Technical Support Center*, *Xi' an* 710014, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In this paper, the daily meteorological data (such as temperature, relative humidity and wind speed) from the meteorological stations in Shaanxi Province from 1981 to 2016 were used. The purposes of the study were to analyze the comfort index of human body (CIHB), divide the meteorological comfort level, discuss the influence of various environmental factors on the CIHB, and provide the evidences for evaluating the people's living environment and also the technical support for government decision-making. The results show that: ① From 1981 to 2016, the variation trends of the CIHB and comfort days in Shaanxi Province were consistent. The CIHB and comfort days were all less in the north but more in the south, and they decreased with the increase of elevation. They were the highest in the Hanzhong Basin, the average annual comfort days at Hanzhong and other 8 stations were more than 200 days; they were the lowest in north Shaanxi, and the average annual comfort days at Yulin and other 6 stations were less than 120 days; ② The curves of comfort frequency in all the regions were unimodal. The highest frequency of comfort days (84%) in south Shaanxi occurred in June, and that (80%) in north Shaanxi and Guanzhong in July. The frequency of comfort level was high in north Shaanxi from July to August, in Guanzhong from June to August, and in south Shaanxi from June to September. These revealed that the time span and occurrence frequency of comfort level in Shaanxi Province decreased gradually from the south to the north; ③ In the past years, the average CIHB of whole Shaanxi Province was 45.7, the average comfort level days was 92.4, and the average frequency was 44.1%. The average CIHB and comfort level days were in an increase trend in the past years, and there were the obvious periodic changes. Two peak values of CHIB and comfort level days occurred during the periods of 1998 -1999 and 2008 -2009 respectively; ④ There was a significant correlation between the temperature and the CIHB, and the correlation coefficient was as high as 0.960 5. There was a significantly negative correlation between the relative humidity and the CIHB, but a significantly positive one when the temperature was high. Average wind speed was negatively correlated with CIHB. Generally speaking, the change of CIHB was mainly caused by the change of climatic factors.

Key words: comfort index of human body; classification of comfort level; comfort day; comfort period; Shaanxi Province